

# PROYECCIONES MULTI-MODELO DE CLIMA DE OLEAJE EN EL ATLÁNTICO NORTE

Jorge PÉREZ GARCÍA<sup>1</sup>, Melisa MENÉNDEZ GARCÍA<sup>1</sup>, Paula CAMUS BRAÑA<sup>1</sup>, Fernando J. MÉNDEZ INCERA<sup>1</sup>, Íñigo J. LOSADA RODRÍGUEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Hidráulica Ambiental “IH Cantabria”, Universidad de Cantabria,  
jorge.perezgarcia@unican.es, melisa.menendez@unican.es, paula.camus@unican.es,  
fernando.mendez@unican.es, inigo.losada@unican.es

## RESUMEN

Tener estimaciones fiables de parámetros del clima marítimo futuro (i.e. altura de ola significativa, periodo medio, dirección media) es esencial para diversas aplicaciones, como la planificación y el diseño de las defensas costeras del litoral. Sin embargo, estas variables no se simulan directamente por los modelos climáticos globales (GCMs) y la resolución de otros parámetros (por ejemplo, los campos de viento en superficie, principal forzamiento de las olas) es demasiado grosera.

Los GCMs pueden ser utilizados para obtener información de clima marítimo a alta resolución espacial por métodos de regionalización (‘downscaling’) dinámicos y estadísticos. Este trabajo presenta una regionalización estadística basada en tipos de tiempo. La clasificación de tipos de tiempo se desarrolla mediante la aplicación de la técnica K-medias sobre los campos de presión a nivel del mar en la región de estudio (predictor). Posteriormente, cada tipo de tiempo se vincula a las condiciones históricas de oleaje (predictando multivariado).

Los bajos requerimientos computacionales del enfoque estadístico permiten considerar un amplio conjunto de modelos. Además, la habilidad de los GCMs para reproducir la circulación atmosférica en la región de interés es analizada y sólo se consideran los mejores modelos. Finalmente, se muestra la aplicación de este marco metodológico en el Atlántico Norte. Las proyecciones climáticas de oleaje basadas en la quinta fase del “Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP5) muestran un descenso de la altura de ola en esta región.

Palabras clave: Cambio climático; Escenarios; Modelos climáticos globales; Oleaje; Regionalización; Tipos de tiempo.

## ABSTRACT

Reliable estimations of future wave climate parameters (i.e. significant wave height, mean wave period, mean wave direction) are essential for several applications such as coastal planning and design of coastal defenses. However, these variables are not directly simulated by global climate models (GCMs) and the resolution of other parameters (e.g. the surface wind fields, main forcing of waves) is too coarse.

Wave climate information at high spatial resolution can be obtained from GCMs by dynamical and statistical downscaling methods. This work presents a weather-type statistical downscaling. The weather type classification is developed by applying the clustering technique K-means over the sea level pressure fields in the study region (predictor). Then, each weather type is linked to historic wave conditions from a wave hindcast (multivariate predictand).

The low computational requirements of the statistical approach allow considering a large ensemble of models. Moreover, the skill of GCMs to reproduce the atmospheric circulation in the region of interest is analyzed and only the best performing models are considered. Finally, the application of this framework in the North Atlantic Ocean is shown. Wave climate projections based on the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) show a decrease in wave height in this region.

**Keywords:** Climate change; Scenarios, Global climate models; Downscaling; Wind-waves; Weather types.

## 1. INTRODUCCIÓN

El tipo de actividades que desarrolla el hombre en la costa dependen del clima marítimo, así como el tipo de ecosistemas y hábitats de una determinada región. Estudiar los efectos del cambio climático sobre el clima marítimo permite comprender mejor los impactos potenciales futuros. Por ejemplo, un incremento en la energía del oleaje que alcanza las costas podría producir retrocesos en las playas, una reducción en la operatividad de los puertos, o incrementos de los caudales de rebase en las estructuras costeras, así como una alteración en las comunidades intermareales.

Los modelos climáticos globales (GCMs) permiten estudiar el comportamiento de un gran número de variables ante distintos escenarios de cambio climático. Sin embargo, el oleaje no es simulado directamente por los GCMs. Es necesario utilizar métodos dinámicos o estadísticos para obtener el clima marítimo futuro. Los métodos dinámicos se basan en la utilización de un modelo numérico y requieren un esfuerzo computacional elevado. Por ello, habitualmente se centran en un único GCM y un número reducido de escenarios de cambio climático. En cambio, los estudios estadísticos, gracias al menor coste computacional, permiten analizar un número muy superior de combinaciones de GCMs y escenarios. Esto permite considerar la incertidumbre asociada a la elección del GCM y la influencia de distintos escenarios de cambio climático en el oleaje.

En este estudio se define una metodología de tipo estadístico para obtener proyecciones regionales de clima marítimo. La metodología se basa en una clasificación de tipos de tiempo en la que cada situación atmosférica se relaciona con las condiciones de oleaje históricas. Este método presta especial atención a la definición de la variable predictora, así como la selección del área geográfica que describe, con el fin de simular correctamente las distintas familias de oleaje. Además, se considera la incertidumbre de los GCMs, evaluando la capacidad de los GCMs para representar la climatología en un periodo control. El objetivo es obtener proyecciones de oleaje robustas.

El documento se estructura en cinco secciones, siendo la primera esta introducción. En la segunda sección “Datos” se describen las bases de datos atmosféricas y de oleaje utilizadas. La tercera sección “Metodología” describe la clasificación de tipos de tiempo, las técnicas de downscaling estadístico, la selección de GCMs y las proyecciones de clima marítimo. En la cuarta sección “Resultados” se muestran las proyecciones de oleaje a escala regional y local. La última sección contiene las conclusiones más importantes.

## 2. DATOS

En este trabajo se han utilizado datos procedentes de tres fuentes: (i) un reanálisis atmosférico; (ii) proyecciones de cambio climático de GCMs y (iii) una reconstrucción histórica de oleaje.

### 2.1. Reanálisis atmosférico

Los reanálisis atmosféricos son reconstrucciones históricas que proporcionan datos que se pueden considerar cuasi-reales. En este trabajo se ha utilizado el “Climate Forecast System Reanalysis” (CFSR, Saha et al. 2010) generado por “The National Centers for Environmental Prediction” (NCEP). Los datos de vientos a 10 metros de altura y concentración de hielo se han utilizado como forzamientos en la reconstrucción histórica de oleaje. Los datos de presión a nivel del mar a escala diaria se han utilizado para realizar la clasificación sinóptica de tipos de tiempo. CFSR es especialmente adecuado para el modelado de oleaje ya que cuenta con una elevada resolución espacial ( $\sim 0.3^\circ$ ) y temporal (horaria).

### 2.2. GCMs

Los GCMs representan la evolución climática ante posibles escenarios socio-económicos de cambio climático. En este estudio se analiza el conjunto de modelos de la quinta fase del “Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP5). Se han utilizado los campos de presión al nivel del mar diarios de simulaciones “Historical” para representar las condiciones del pasado y de RCP4.5 y RCP8.5 (Representative Concentration Pathways, Moss et al. 2010) para representar condiciones futuras. El RCP4.5 representa un escenario con un nivel de emisiones intermedio, mientras que el RCP8.5 representa un futuro de altas emisiones. Todos los datos se han interpolado a una rejilla de dos grados por dos grados en el mismo dominio espacial que se utiliza para realizar la clasificación de tipos de tiempo.

### 2.3. Datos históricos de oleaje

Se ha generado una reconstrucción del oleaje forzada por hielos y vientos del reanálisis CFSR entre 1979 y la actualidad. Para ello se ha utilizado el modelo numérico WAVEWATCH III (Tolman, 2009) en su versión 4.18 y activando los términos fuente de Ardhuin et al. (2010). Se ha empleado una configuración multigrad con anidamiento ‘two-way’ que permite simular con mayor resolución espacial sobre las plataformas continentales, donde la batimetría afecta más al oleaje. El conjunto de seis mallas lo componen una malla global de  $1.5^\circ \times 1^\circ$  a la que se anida una malla de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  en el Atlántico Norte. La malla del Atlántico contiene cuatro mallas de  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ : una gran malla que cubre Europa y tres pequeñas mallas sobre los archipiélagos Azores, Canarias y Cabo Verde. La validación con datos de satélite y boyas muestra resultados excelentes. Por ejemplo, la altura de ola significativa presenta correlación superior a 0.95 y scatter index inferior a 0.15 en toda la fachada Atlántica.

### 3. METODOLOGÍA

La figura 1 describe la metodología utilizada para obtener proyecciones regionales de clima marítimo. Primero, se hace una clasificación de tipos de tiempo a partir de un reanálisis atmosférico. Después, se establece la técnica de downscaling estadístico basada en una relación empírica entre los tipos de tiempo y el clima marítimo multivariado. Por otra parte se vuelca la información de los GCMs en la clasificación para analizar la calidad de las simulaciones y evaluar cambios en la frecuencia de presentación de las situaciones sinópticas. Por último, se combinan la técnica estadística y los cambios en la circulación atmosférica para obtener proyecciones de clima marítimo.

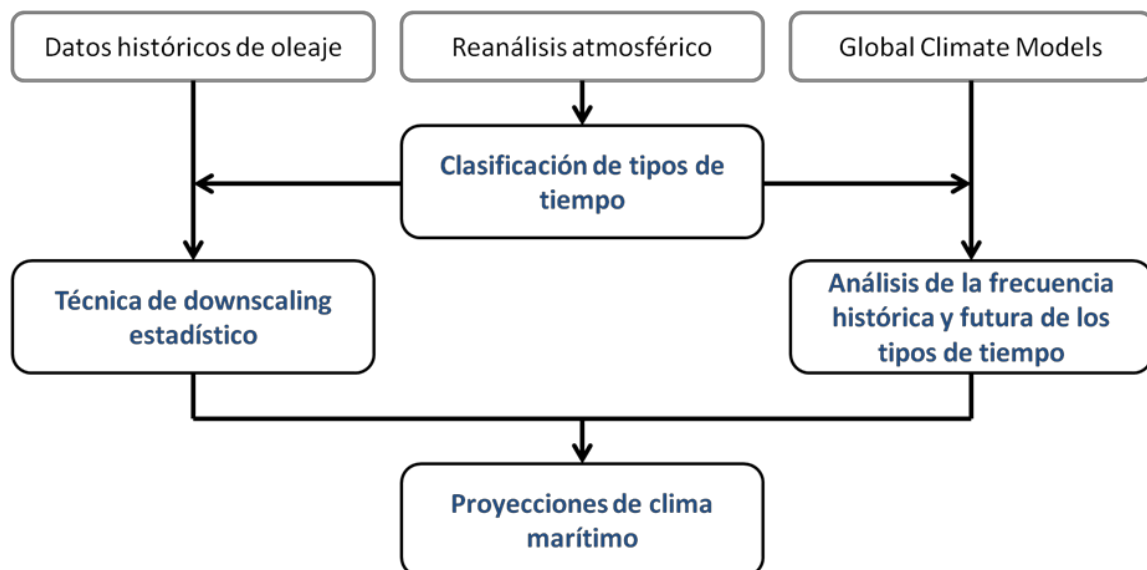


Fig. 1: Diagrama de la metodología para obtener proyecciones regionales de oleaje.

### 3.1. Clasificación de tipos de tiempo

Los tipos de tiempo se definen en función de los campos de presiones a nivel del mar (SLP) en el Atlántico Norte. El predictor se establece siguiendo la metodología propuesta por Camus et al. (2014) conservando la escala diaria de los campos de magnitud y gradientes de SLP pero agrupándolos en bloques de tres días. Es necesario considerar la situación atmosférica durante tres días para tener en cuenta cambios atmosféricos durante la propagación del oleaje. Los bloques 3-diaros son sintetizados utilizando varias herramientas de minería de datos (componentes principales y K-medias) para obtener  $N$  tipos de clima representativos.

El número de tipos de clima considerado se ha fijado en  $N=100$  como solución de compromiso entre un número de clases suficientemente grande como para contener situaciones que en el presente son poco probables pero pueden aparecer con mayor frecuencia en las próximas décadas, y a la vez suficientemente pequeño como para que el número de datos disponibles en cada clase permita construir tipos de tiempo representativos.

Los 100 tipos de clima se han representado en una cuadrícula 10x10 organizada minimizando la suma de errores cuadráticos entre tipos de tiempo contiguos (Figura 2). Esto facilita la interpretación de resultados al permitir que los tipos de tiempo de características similares se muestren agrupados según un criterio de proximidad.

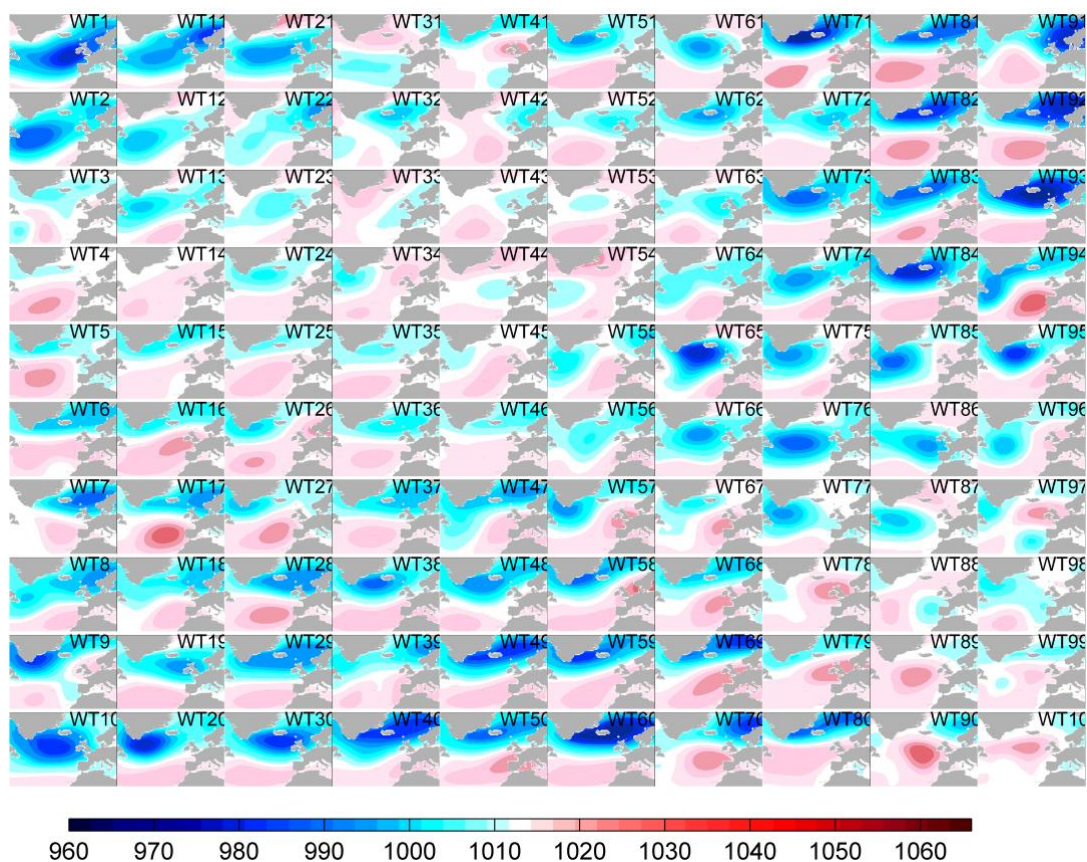


Fig. 2: Clasificación de tipos de tiempo en el Atlántico Norte. Se muestra la SLP en mb del último de los 3 días de cada bloque.

### 3.2. Técnica de downscaling estadístico

El downscaling está basado en el hecho de que el clima marítimo a escala local está determinado por los patrones circulatorios de meso y gran escala mediante una relación  $Y=f(x)$ , donde el predictando  $Y$  representa el clima marítimo a escala local mientras que el predictor  $X$  es un tipo de tiempo o patrón sinóptico de circulación atmosférica.

Una vez establecidos los tipos de tiempo en la región de interés, se vincula cada dato de oleaje local con el tipo de tiempo más parecido a la situación atmosférica real que produjo dicho oleaje. Se tiene así, para cada tipo de tiempo, la colección de estados de mar asociados. Esto permite caracterizar la distribución del oleaje vinculado a cada tipo de tiempo (Figura 3).

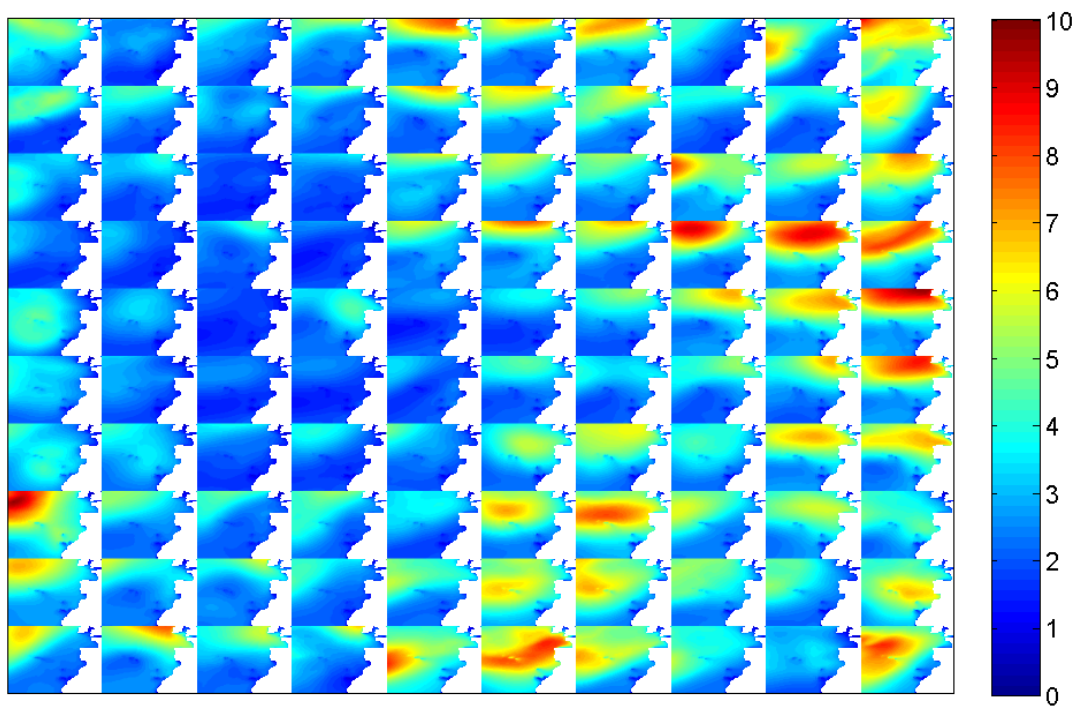


Fig. 3: Altura de ola significativa en el Atlántico Norte para cada tipo de tiempo (en metros).

### 3.3. Análisis de la frecuencia histórica y futura de los tipos de tiempo

Para evaluar los cambios en la frecuencia de situaciones sinópticas se ha definido un periodo control de 1980 a 2000 y dos periodos futuros: 2040-2070 y 2070-2100. Los datos de SLP de los GCMs en estos periodos se han procesado de la misma forma que los del reanálisis CFSR para volcarlos en la clasificación de tipos de tiempo. El proceso de volcado consiste en asignar el tipo de tiempo más parecido por mínimo error cuadrático. De esta forma se puede evaluar la frecuencia de presentación de cada tipo de tiempo en los periodos de estudio.

Las incertidumbres en las simulaciones (por ejemplo en forzamientos y parametrizaciones) hacen que las frecuencias calculadas a partir de distintos GCMs sean diferentes. Para reducir



la incertidumbre en las proyecciones es aconsejable utilizar un ensemble de varios modelos de forma que se compensen las deficiencias de las simulaciones individuales. La elección de los modelos a utilizar para la construcción del ensemble es una decisión a la que habitualmente se presta escasa atención a pesar de que afecta claramente a los resultados. En este estudio se ha realizado un análisis de calidad siguiendo la metodología propuesta por Perez et al. (2014). La figura 3 muestra los GCMs ordenados por su capacidad para representar la frecuencia de los tipos de tiempo en el periodo control con respecto al reanálisis. En el ensemble final se han utilizado todos los modelos que aparecen reflejados en la figura 4 excepto IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR y FGOALS-s2. Estos modelos se han descartado ya que reproducen el predictor seleccionado claramente peor que el resto.

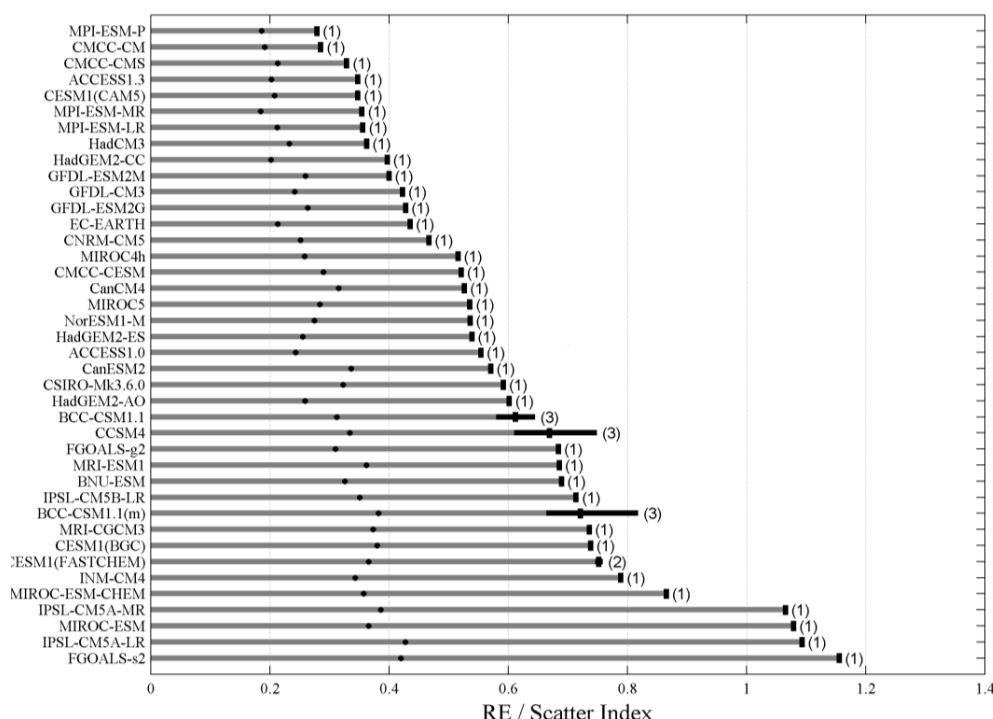


Fig. 4: GCMs ordenados por su habilidad para simular las situaciones sinópticas en el periodo control.

### 3.3. Proyecciones de clima marítimo

Una vez definido el predictando ( $Y_i$ ) asociado a cada tipo de tiempo ( $WT_i$ ) los cambios en el clima marítimo ( $\Delta Y_i$ ) pueden calcularse a partir de los cambios en la frecuencia de presentación de los tipos de tiempo ( $\Delta f_i$ ):

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^N \Delta f_i \cdot Y_i \quad (1)$$

En este estudio se han utilizado dos variables del oleaje como predictandos: La altura de ola significativa media y el periodo medio. Los cambios de estos dos parámetros han sido calculados en aproximadamente 30000 nodos de la región atlántica europea. Esto se ha hecho

para todas las simulaciones de GCMs, tanto de RCP4.5 como de RCP8.5, en el medio (2040-2070) y largo plazo (2070-2100), respecto al control. El ensemble se ha construido dando el mismo peso a todos los GCMs. Los cambios en el oleaje ( $\Delta Y$ ) para los distintos GCMs en un mismo escenario y periodo permiten obtener el cambio promedio para el ensemble completo y evaluar su incertidumbre.

## 4. RESULTADOS

El efecto del cambio climático en el oleaje se ha estudiado en dos escalas espaciales: la escala regional y la escala local. Se han marcado los nodos en los que la incertidumbre de las proyecciones es menor (más del 80% de las simulaciones coinciden en el signo del cambio).

### 4.1. Proyecciones regionales

En la figura 5 se muestran las proyecciones de altura de ola significativa (hs) para el ensemble completo. Se puede apreciar una clara reducción de la hs media en el Atlántico. Esta reducción es más intensa para el RCP8.5 que para el RCP4.5, y en ambos casos se intensifica en el largo plazo llegando a disminuir la hs media más de 20 cm. En el caso de RCP8.5 la mayoría de modelos coinciden en pronosticar este cambio. Sin embargo, para RCP 4.5 no hay tanta uniformidad. Los cambios en el periodo medio (tm02) del oleaje tienen un patrón espacial similar, y presentan reducciones de hasta 0.2 segundos.

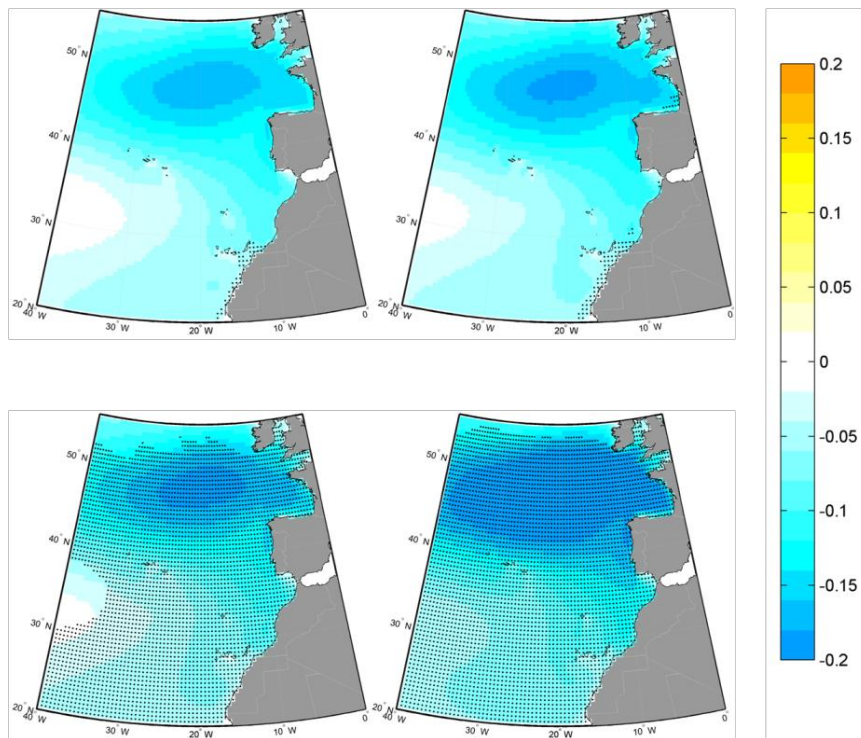


Fig. 6: Cambios en la altura de ola significativa media en el Atlántico Norte para el RCP4.5 (arriba) y el RCP8.5 (abajo). A la izquierda el periodo 2040-2070 y a la derecha 2070-2100.



A pesar de que la mayoría de modelos coinciden en pronosticar una reducción de  $h_s$  y  $tm02$  en el Atlántico, otros, como el MPI-ESM-LR y el MRI-CGCM3 muestran un fuerte aumento. Esto es indicativo del riesgo de basarse en un único modelo para hacer proyecciones.

## 4.2. Proyecciones locales

El oleaje en las proximidades de la costa se ve sometido a efectos locales (e.g. refracción, difracción y fricción por fondo) que modifican de forma importante sus características. Esto provoca que los cambios que se observan a gran escala difieran de forma importante de los que se observan cerca de costa. En la figura 5 se muestran las proyecciones de  $h_s$  media en las islas Canarias. Se puede observar como los patrones de cambio en las zonas de aguas abiertas y en las zonas de sombra son diferentes. Esto indica la necesidad de utilizar datos de oleaje de alta resolución para estudiar cambios en el oleaje cerca de costa.

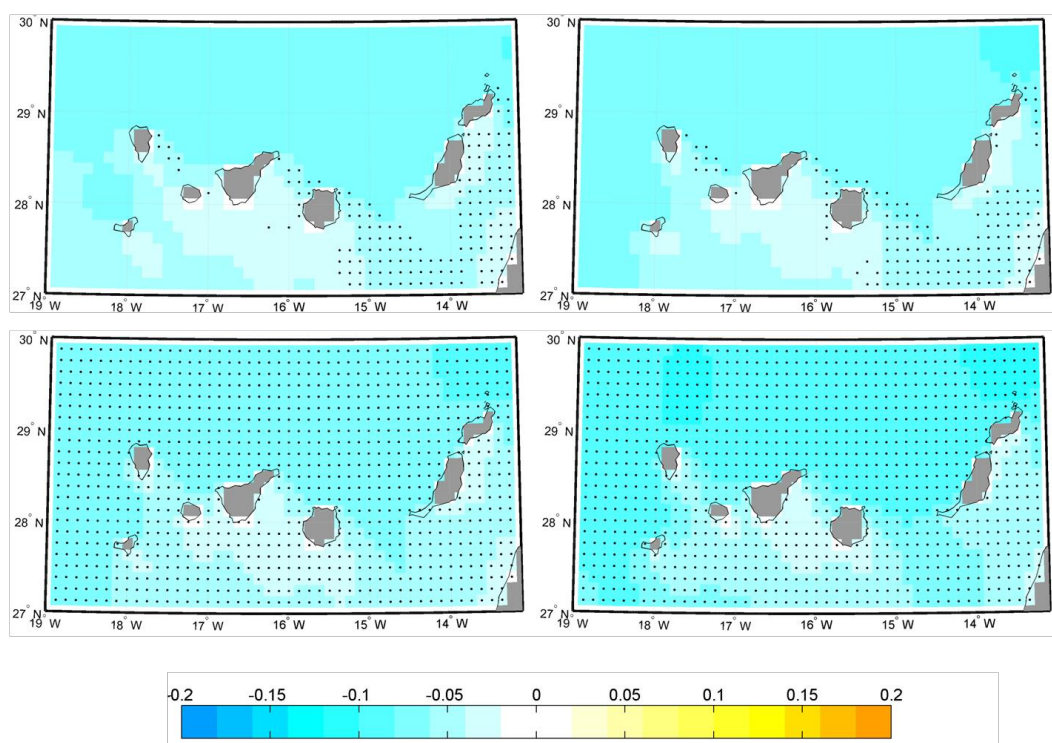


Fig. 5: Cambios en la altura de ola significativa media en las islas Canarias para el RCP4.5 (arriba) y el RCP8.5 (abajo).

## 5. CONCLUSIONES

Se ha definido un marco metodológico para obtener proyecciones de oleaje basado en tipos de tiempo. En este trabajo se han utilizado los campos de presiones a nivel del mar como predictor. Esta variable ha resultado especialmente adecuada para representar el efecto de los campos de viento sobre el medio marino, y además, es mucho más robusta en el modelado

climático que los vientos en superficie. Como predictando se ha utilizado una reconstrucción numérica de oleaje pero es extrapolable a medidas instrumentales (e.g. boyas).

Esta metodología presenta varios puntos clave:

- La relación predictor-predictando permite entender qué cambios en la circulación atmosférica provocan los cambios en las condiciones de oleaje.
- Debido a su bajo coste computacional, es posible considerar un gran número de simulaciones y tener una medida de la incertidumbre asociada a las proyecciones.
- El análisis de la habilidad de los modelos en el periodo control permite descartar modelos que muestren un comportamiento significativamente peor que los demás. De esta forma se obtienen proyecciones más robustas.
- Se puede utilizar para estudiar zonas de batimetría compleja próximas a la costa utilizando reconstrucciones de oleaje de alta resolución.

Los resultados obtenidos indican un descenso de altura de ola y periodo medio en el dominio seleccionado. Estos resultados son coherentes con los de estudios globales estadísticos (Wang et al. 2014) y dinámicos (Fan et al. 2014) que también muestran una reducción de ola en el Atlántico Norte. La aplicación de esta metodología en el conjunto de cuencas oceánicas haría posible obtener proyecciones multi-modelo de alta resolución a escala global.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto iMar21 (CTM2010-15009) del gobierno español y el proyecto europeo FP7 CoCoNet (287844). Los autores queremos agradecer a los grupos modeladores que han generado los datos utilizados y a la ESGF por facilitar el acceso a ellos.

## 7. REFERENCIAS

- Ardhuin, F.; Rogers, E.; Babanin, A.V.; Filipot, J.-F.; Magne, R.; Roland, A.; ... Collard, F. (2010). *Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation*. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9), 1917–1941. doi:10.1175/2010JPO4324.1
- Camus, P.; Méndez, F.J.; Losada, I.J.; Menéndez, M.; Espejo, A.; Pérez, J.; Rueda, A. y Guanche Y. (2014). *A method for finding the optimal predictor indices for local wave climate conditions*. 10.1007/s10236-014-0737-2
- Fan, Y.; Lin, S.-J.; Griffies, S. M.; Hemer, M. A. (2014). *Simulated global swell and wind-sea climate and their responses to anthropogenic climate change at the end of the twenty-first century*. *J. Climate*, 27, 3516–3536. doi:10.1175/JCLI-D-13-00198.1
- Moss, R.H.; Edmonds, J. a; Hibbard, K. a; Manning, M.R.; Rose, S. K.; van Vuuren, D. P.; ... Wilbanks, T.J. (2010). *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. *Nature*, 463(7282), 747–756. doi:10.1038/nature08823
- Perez, J., Menendez, M., Mendez, F. J., & Losada, I. J. (2014). *Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region*. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-014-2078-8
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... Goldberg, M. (2010). *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 91(8), 1015–1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.1
- Tolman, H. L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14*. Technical note, MMAB Contribution, (276).
- Wang, X.L.; Feng, Y. y Swail, V.R. (2014). *Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations*. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1026–1034. doi:10.1002/2013GL058650.1.